

相対論プラズマにおける磁化率の相違による
Hモード様電場の形成と閉じ込め

**Formation of H-mode like electric field and confinement of relativistic plasma
due to the difference of magnetic susceptibility between electrons and ions**

松井 隆太郎¹、桧垣 慎太郎¹、岸本 泰明^{1,2,3}

^ARyutaro Matsui, ^AShintaro Higaki and ^{A,B,C}Yasuaki Kishimoto

京大エネ科¹、京大プラズマ科学ユニット²、京大エネ研³

^AGSSES, Kyoto Univ., ^BPlasma Science UNIT, Kyoto Univ., ^CIAE, Kyoto Univ.

集光強度が 10^{19-20} W/cm²領域のフェムト秒高強度レーザーをサブ μm オーダーの微細構造を有する物質(構造ターゲット)に照射することで、有限サイズの高エネルギー密度プラズマ(バルクプラズマ)が生成する。その際、ターゲットの構造を適切に設計することで、プラズマ中に電流回路とそれによる強磁場が形成され、これによりパルス幅と集光径(数 μm)を上回る時空間でプラズマが保持されることがシミュレーション研究により示されている[1,2]。一方で、圧力平衡が成立しなければ、プラズマはやがて拡散する。例えばP-B熱核融合反応の実現を見据えたプラズマの長時間(ナノ秒オーダー)保持を達成するには、プラズマ中への圧力平衡の導入が不可欠となる。

我々は、近年開発が進んでいるナノ秒オーダーのキロテスラ(kT)級磁場[3]をレーザー生成プラズマ中に印加すれば、プラズマの自己組織化過程を通じて、プラズマと磁場の圧力平衡が実現するとの着想[4]に基づき、直径がサブ μm オーダーの円柱状物質(ロッド)に、kT級磁場をロッド側面方向に一樣に印加したターゲットを用いて、パルス幅が数十フェムト秒で集光強度が 10^{19-20} W/cm²領域の高強度レーザーを照射する粒子シミュレーションを実施し、プラズマ中で形成される電磁場構造とそのダイナミクスを詳細に調べた。

レーザー場との相互作用によりロッド表面から剥ぎ取られた相対論電子がロッドの外側に分布することで、図1(a)に示すように、ロッドの表面近傍にはTV/mに達する電場(+y方向)が形成され、これによりイオンは一度膨張する(両極性膨張)[5]。しかし、相互作用の後、ロッドの外側に分布する電子の大部分は、外部磁場に沿った方向(x方向)に磁化することから、ロッド内部のラーマー半径($\pm 2 \mu\text{m}$)程度の領域に留まる。一方、質量の大きいイオンは磁化せず、慣性にしたがって膨張

を続けることから、図1(b)に示すように、電子とイオンの配位が逆転する。これにより、ロッドの内部方向(-y方向)にイオンを閉じ込める機能を有する反転電場(Hモード様電場)が形成される。この時、外部磁場と反転電場により、反転電場が形成される領域近傍において、電子の $E \times B$ ドリフトによりロッド軸方向に沿った電流が生成し、この電流が作る磁場がプラズマ領域の外部磁場を打ち消すことで、プラズマと磁場の圧力が均衡するミラー型の磁場構造が形成される。これにより、数100keVの温度を有するイオンを数ピコ秒にわたり閉じ込めることを見いだした。

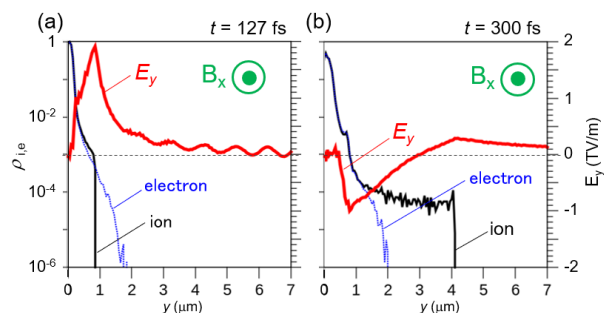


図1. レーザー入射後(a) $t = 133$ fs、(b) $t = 300$ fs後の、イオン(黒)、電子(青)、電場 E_y (赤)についての、ロッド中心から+y方向の断面図。外部一様磁場はx(紙面に垂直)方向に印加。

- [1] Y. Kishimoto *et al.*, IFSA (2019).
- [2] 松井隆太郎他、日本物理学会2022年秋季大会、2022年9月。
- [3] S. Fujioka *et al.*, *Sci. Rep.* 3, 1170 (2013).
- [4] 岸本泰明他、プラズマ核融合学会第36回年会、2019年11月。
- [5] Y. Kishimoto, T. Masaki, and T. Tajima, *Phys. Plasmas* 9, 589 (2002).